

円管内固液二相流の数値計算に関する基礎的研究

学位論文内容の要旨

固形物の管路や開水路を用いた輸送は様々な分野で行われており、土木工学、機械工学、化学工学などで基礎的研究が盛んに行われている。本研究で対象とする固液二相流であるスラリーは、広い粒度分布をもった不規則形状の粒子群と流体との混合物であり、粒子群と流体の相互作用で運動している複雑な流れであるため、流体と粒子の運動方程式を基にした流れの厳密な解析はきわめて困難な課題であった。そのため従来の研究はスラリーを非沈降性と沈降性に大きく分け、それぞれに対応した方法で行われてきた。

非沈降性スラリーの場合には、一様な濃度分布を持つスラリーを巨視的に一相流として取り扱い、見かけの応力と平均速度の関係を調べるレオロジー的手法や、粒子と流体の相互作用をモデル化して扱う流体力学的手法が用いられており、これらの方法を用いて一定の成果が収められている。

一方、沈降性スラリーでは、流れに関与すると予想される諸変数から無次元量の組を求め、それらの相互関係から実験式を求める方法や、流れを簡単なモデルに近似して、実験定数による測定値との整合を取る方法が行われてきた。しかしながら流れの状態が粒子や流送条件によって大きく変化するため、未だ一般性のある実験式は確立には至っていないのが現状である。

これらの実験式の持つ弱点を克服するために、最近では流体や粒子の基礎方程式の数値計算に基づく研究が増加している。しかし固液二相流の数値計算は固気の数値計算に比べ、流体と粒子の相互作用の計算の難しさもあり、全般にその数が少ない。とりわけ輸送で使用される円管を対象とした3次元円筒座標による計算報告はきわめて限られ、ライン設計に必要な管内の圧力損失についての言及は皆無である。3次元円筒座標による計算には管の中心や円周方向の計算処理に工夫が必要であるが、円管内の固液二相流の詳細な解析には3次元円筒座標による計算が望ましい。本研究では、円管内固液二相流の円筒座標を用いた数値計算法の開発とその結果の検証を行った。

本研究の内容を大別すると、混相流の数値計算に必要な基礎方程式とその解法の説明、回転矩形容器内粒子運動の数値計算、そして本研究の目的である円管内固液二相流の数値計算の三つに分けられる。

第1章では固液二相流を対象とした従来の実験による研究と、近年増加している数値計算による研究について述べた。従来行われてきたスラリー輸送の研究については、スラリーを輸送する上で重要な圧力損失の予測式について述べた。また圧力損失の予測式には、式が複雑であり、評価が困難な変数が含まれるなどの弱点をもつ一般性に乏しい式もあることを示した。また近年増

加してきた数値計算による混相流の研究についてとりあげ、粒子運動を取り扱う諸計算法を概説し、固液混相流の数値計算的研究がまだ発展段階にあることを述べた。

第2章では本研究で使った数値計算の手法について示した。流体相の計算では、粒子相から流体相への影響を考える上で制約のあった粒子サイズの問題について検討し、計算セル幅の約1.73倍の径を持つ粒子に対応できる計算法を提案した。粒子の運動方程式に含まれる粒子間の接触力の計算は、新たに粒度分布を持つ粒子に対応できる離散要素法(DEM)モデルを作成して行った。従来困難であった粒子間摩擦係数については、4球を用いる測定法を提案し、水中動摩擦係数の測定と結果およびDEMの計算に必要な他の諸係数の調整について述べた。

第3章では回転矩形容器中の粒子運動を数値計算し、実験との比較・検討から計算の最適条件を求めた。まず実験の方法と手順および計算に必要な基礎方程式と条件について述べ、次に粒子表面の粗さと壁面荒さを調べるために行った実験結果について述べた。壁面および粒子表面の粗さの影響を計算に反映させるために、本研究では壁に凸面を作ることに対応した。これは計算上、壁であると仮定して配置された粒子をずらして配置することで、粒子が前方へ転がりにくくするものである。この凸面の高さを決定するための試行錯誤を行い、補正角度を決定した。この補正角度を用いて計算した粗さは測定した粗さにほぼ一致することを示した。

第4章では第3章で行われた計算条件を用い、円管内の粒子運動を計算した。計算領域・計算条件および円筒座標系方程式を示し、周期境界条件を配したことで生じる管軸方向の圧力の取り扱いに関する問題と周期境界を配した場合の管内圧力勾配の計算方法について述べた。さらに単相流と混相流の管内平均流速分布の違いや、粒子を投入することによる圧力損失の増加について述べた。管内の粒子速度については、管中心で速く壁近傍で遅いことを示し、管の外側から粒子速度を測定する測定法では正しい結果が得られないことを述べた。さらに粒子-粒子間摩擦係数と粒子-壁間摩擦係数および粒子の転がり抵抗の検討結果についても述べた。

第5章では以上の章で述べたことを総括している。

本研究の目的は固液二相流の計算を粒子および流れの基礎方程式に基づいて行うことである。より厳密な計算を行うには非球粒子への対応など、課題はまだ多く存在するが、以上に述べた結果は、数値計算による固液二相流研究の可能性を示唆していると思われる。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 朝 倉 國 臣
副 査 教 授 太 田 幸 雄
副 査 教 授 清 水 達 雄
副 査 助 教 授 五十嵐 敏 文

学 位 論 文 題 名

円管内固液二相流の数値計算に関する基礎的研究

固形物の管路や開水路を用いた輸送は様々な分野で行われており、土木工学、機械工学、化学工学などで基礎的研究が盛んに行われている。本研究で対象とする固液二相流であるスラリーは、広い粒度分布をもった不規則形状の粒子群と流体との混合物であり、粒子群と流体の相互作用で運動している複雑な流れであるため、流体と粒子の運動方程式を基にした流れの厳密な解析はきわめて困難な課題であった。そのため従来の研究はスラリーを非沈降性と沈降性に大きく分け、それぞれに対応した方法で行われてきた。

非沈降性スラリーの場合には、一様な濃度分布を持つスラリーを巨視的に一相流として取り扱い、見かけの応力と平均速度の関係を調べるレオロジー的手法や、粒子と流体の相互作用をモデル化して扱う流体力学的手法が用いられており、これらの方法を用いて一定の成果が収められている。

一方、沈降性スラリーでは、流れに関与すると予想される諸変数から無次元量の組を求め、それらの相互関係から実験式を求める方法や、流れを簡単なモデルに近似して、実験定数による測定値との整合を取る方法が行われてきた。しかしながら流れの状態が粒子や流送条件によって大きく変化するため、未だ一般性のある実験式の確立には至っていないのが現状である。

これらの実験式の持つ弱点を克服するために、最近では流体や粒子の基礎方程式の数値計算に基づく研究が増加している。しかし固液二相流の数値計算は固気の数値計算に比べ、流体と粒子の相互作用の計算の難しさもあり、全般にその数が少ない。とりわけ輸送で用いられる円管を対象とした 3 次元円筒座標による計算報告はきわめて限られ、ライン設計に必要な管内の圧力損失についての言及は皆無である。3 次元円筒座標による計算には管の中心や円周方向の計算処理に工夫が必要であるが、円管内の固液二相流の詳細な解析には 3 次元円筒座標による計算が望ましい。本研究では、円管内固液二相流の円筒座標を用いた数値計算法の開発とその結果の検証を行った。

本研究の内容を大別すると、混相流の数値計算に必要な基礎方程式とその解法の説明、回転矩形容器内粒子運動の数値計算、そして本研究の目的である円管内固液二相流の数値計算の三つに分けられる。

第 1 章では固液二相流を対象とした従来の実験による研究と、近年増加している数値計算による研究について述べた。従来行われてきたスラリー輸送の研究については、スラリーを輸送する上で重要な圧力損失の予測式について述べた。また圧力損失の予測式には、式が複雑であり、評価が困難な変数が含まれるなどの弱点をもつ一般性に乏しい式もある

ことを示した。また近年増加してきた数値計算による混相流の研究についてとりあげ、粒子運動を取り扱う諸計算法を概説し、固液混相流の数値計算的研究がまだ発展段階にあることを述べた。

第2章では本研究で使用した数値計算の手法について示した。流体相の計算では、粒子相から流体相への影響を考える上で制約のあった粒子サイズの問題について検討し、計算セル幅の約1.73倍の径を持つ粒子に対応できる計算法を提案した。粒子の運動方程式に含まれる粒子間の接触力の計算は、新たに粒度分布を持つ粒子へ対応できる離散要素法(DEM)モデルを作成して行った。従来困難であった粒子間摩擦係数については、4球を用いる測定法を提案し、水中動摩擦係数の測定と結果およびDEMの計算に必要な他の諸係数の調整について述べた。

第3章では回転矩形容器中の粒子運動を数値計算し、実験との比較・検討から計算の最適条件を求めた。まず実験の方法と手順および計算に必要な基礎方程式と条件について述べ、次に粒子表面の粗さと壁面荒さを調べるために行った実験結果について述べた。壁面および粒子表面の粗さの影響を計算に反映させるために、本研究では壁に凸面を作ることに対応した。これは計算上、壁であると仮定して配置された粒子をずらして配置することで、粒子が前方へ転がりにくくするものである。この凸面の高さを決定するための試行錯誤を行い、補正角度を決定した。この補正角度を用いて計算した粗さは測定した粗さにほぼ一致することを示した。

第4章では第3章で行われた計算条件を用い、円管内の粒子運動を計算した。計算領域・計算条件および円筒座標系方程式を示し、周期境界条件を配したことで生じる管軸方向の圧力の取り扱いに関する問題と周期境界を配した場合の管内圧力勾配の計算方法について述べた。さらに単相流と混相流の管内平均流速分布の違いや、粒子を投入することによる圧力損失の増加について述べた。管内の粒子速度については、管中心で速く壁近傍で遅いことを示し、管の外側から粒子速度を測定する測定法では正しい結果が得られないことを述べた。さらに粒子-粒子間摩擦係数と粒子-壁間摩擦係数および粒子の転がり抵抗の検討結果についても述べた。

第5章では以上の章で述べたことを総括している。

本研究の目的は固液二相流の計算を粒子および流れの基礎方程式に基づいて行うことである。より厳密な計算を行うには非球粒子への対応など、課題はまだ多く存在するが、以上に述べた結果は、数値計算による固液二相流研究の可能性を示唆している。

これを要するに、著者は、従来実験的に行われていた固液二相流の輸送に関する諸パラメータを、流れと粒子の基礎方程式から求めうる可能性を示したものであり、混相流体力学および地殻環境工学に寄与するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。